


www.peapaleontologica.org.ar

# Aporte de los registros fitolíticos a la reconstrucción paleoambiental del Holoceno Superior en el Valle de Santa María (Tucumán - Argentina)

MARÍA GISELA LEFEBVRE[1,2]
DIEGO ALEJANDRO SAMPIETRO[3]
ALEJANDRO FABIAN ZUCOL[4]
MARÍA DE LOS MILAGROS COLOBIG[4]
MARÍA MARTA SAMPIETRO VATTUONE[1,2]

**1.** Laboratorio de Geoarqueología, Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo, Universidad Nacional de Tucumán. Miguel Lillo 205, 4000, San Miguel de Tucumán, Tucumán, Argentina.
**2.** Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Godoy Cruz 2290, C1425FQB Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.
**3.** Laboratorio de Biología de Agentes Activos y Fitopatógenos, Facultad de Bioquímica, Química y Farmacia, Universidad Nacional de Tucumán. Ayacucho 471, 4000 San Miguel de Tucumán, Tucumán, Argentina.
**4.** Centro de Investigaciones Científicas y Transferencia de Tecnología a la Producción (CICYTTP-UADER-Provincia de Entre Ríos-CONICET). Dr. Materi y España SN, E3105BWA Diamante, Entre Ríos, Argentina.

**Recibido:** 17 de noviembre 2023 - **Aceptado:** 27 de marzo 2024 - **Publicado:** 1 de mayo 2024

**Para citar este artículo:** María Gisela Lefebvre, Diego Alejandro Sampietro, Alejandro Fabian Zucol, María De Los Milagros Colobig, y María Marta Sampietro Vattuone (2024). Aporte de los registros fitolíticos a la reconstrucción paleoambiental del Holoceno Superior en el Valle de Santa María (Tucumán - Argentina). *Publicación Electrónica de la Asociación Paleontológica Argentina* 24(1): 164–182.

**Link a este artículo:** http://dx.doi.org/10.5710/PEAPA.27.03.2024.494




ISSN 2469-0228

**Asociación Paleontológica Argentina**
Maipú 645 1° piso, C1006ACG, Buenos Aires
República Argentina
**Tel/Fax** (54-11) 4326-7563
**Web:** www.apaleontologica.org.ar

ARTÍCULO Año 2024 - 24(1): 164–182




# APORTE DE LOS REGISTROS FITOLÍTICOS A LA RECONSTRUCCIÓN PALEOAMBIENTAL DEL HOLOCENO SUPERIOR EN EL VALLE DE SANTA MARÍA (TUCUMÁN - ARGENTINA)

MARÍA GISELA LEFEBVRE[1,2], DIEGO ALEJANDRO SAMPIETRO[3], ALEJANDRO FABIAN ZUCOL[4], MARÍA DE LOS MILAGROS COLOBIG[4], & MARÍA MARTA SAMPIETRO VATTUONE[1,2]

[1]Laboratorio de Geoarqueología. Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo, Universidad Nacional de Tucumán, Miguel Lillo 205, 4000, San Miguel de Tucumán, Tucumán, Argentina. *gisela_lefebvre_2005@hotmail.com*; *sampietro@tucbbs.com.ar*

[2]Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Godoy Cruz 2290, C1425FQB Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

[3]Laboratorio de Biología de Agentes Activos y Fitopatógenos, Facultad de Bioquímica, Química y Farmacia, Universidad Nacional de Tucumán. Ayacucho 471, 4000 San Miguel de Tucumán, Tucumán, Argentina. *dasampietro2006@yahoo.com.ar*

[4]Centro de Investigaciones Científicas y Transferencia de Tecnología a la Producción (CICYTTP-UADER-Provincia de Entre Ríos-CONICET). Dr. Materi y España SN, E3105BWA Diamante, Entre Ríos, Argentina. *milagroscolobig@gmail.com*; *cidzucol@gmail.com*

 **MGL:** https://orcid.org/0000-0001-5055-4536; **AFZ:** https://orcid.org/0000-0001-5480-3456; **MMC:** https://orcid.org/0000-0002-5886-0965; **MMSP:** https://orcid.org/0000-0002-7681-070X

**Resumen.** El presente trabajo de investigación tiene como objetivo la utilización de los fitolitos como *proxy* para realizar la reconstrucción paleoambiental de la sección media del valle de Santa María (Tucumán - Argentina) durante el Holoceno superior. Además, considerar esto en el contexto paleoambiental regional y global. Para ello, se tomaron muestras de sedimento extraídas en perfiles ubicados en diferentes localidades: Molle Yaco, Yasyamayo y El Pichao. Las asociaciones fitolíticas encontradas muestran la existencia de secciones y subsecciones en las que se divide cada uno de los perfiles. Estas reflejan la presencia de condiciones húmedas y frías desde momentos previos a la era cristiana hasta aproximadamente 1.000 AP cuando las mismas se tornan áridas y cálidas, contemporáneamente a la Anomalía Cálida Medieval, para luego retomar los episodios templados y fríos correlacionables a la Pequeña Edad del Hielo. Las condiciones ambientales actuales están representadas por asociaciones fitolíticas que describen una vegetación árida y semiárida.

**Palabras clave.** NOA. Valles Calchaquíes. Paleoambiente. Vegetación. Medios áridos y semiáridos.

**Abstract.** CONTRIBUTION OF PHYTOLITH RECORDS TO THE PALEOENVIRONMENTAL RECONSTRUCTION OF THE LATE HOLOCENE IN THE SANTA MARÍA VALLEY (TUCUMÁN - ARGENTINA). The present research aims to use phytoliths as proxies to carry out the paleoenvironmental reconstruction of the middle section of the Santa María Valley (Tucumán - Argentina) during the Late Holocene. This is to be considered within the broader regional and global paleoenvironmental context. For this purpose, sediment samples were taken from profiles located in different locations: Molle Yaco, Yasyamayo, and El Pichao. The phytolithic assemblages found reveal the existence of sections and subsections in which each of the profiles is divided. These reflect the presence of humid and cool conditions from pre-Christian era moments until approximately *cal.* 1,000 AP, when conditions become arid and warm, contemporaneously with the Medieval Warm Anomaly, and then resume temperate and cold episodes correlatable to the Little Ice Age. Current environmental conditions are represented by phytolithic assemblages describing arid and semi-arid vegetation.

**Key words.** NOA. Calchaquíes valleys. Paleoenvironment. Vegetation. Arid and semi-arid environments.

Los fitolitos son biomineralizaciones que pueden estar conformadas por sustancias cálcicas (calcifitolitos) o silíceas (silicofitolitos) según su composición química (Bertoldi de Pomar, 1970, 1975; Zucol, 1992). En el caso de los fitolitos de sílice o silicofitolitos constituyen una herramienta valiosa para llevar a cabo diferentes tipos de estudios, ya que son extremadamente resistentes y duraderos. Es por ello que pueden conservarse en suelos y sedimentos antiguos durante millones de años (Stromberg, 2003, 2004; Zurro, 2006; Stromberg *et al.*, 2007). Estas biomineralizaciones se introducen en el suelo como producto de la descomposición y degradación microbiana de los tejidos vegetales y quedan integradas en la fracción mineral. Una vez incorporados, los fitolitos pueden conservarse o disolverse (Borrelli *et al.*, 2010) y entonces están sujetos a diferentes procesos tafonómicos. Entre ellos se incluyen la necrólisis (descompo-

sición y degradación de la planta en el momento de su muerte), bioestratinomía (procesos que tienen lugar después de la muerte de la planta, pero antes del entierro de los fitolitos) y la diagénesis fósil. Esta última comprende los efectos acumulativos de factores físicos, químicos y procesos biológicos que pueden alterar o destruir el fitolito (Osterrieth, 2000, 2008; Osterrieth *et al.*, 2009; Hart y Humphreys, 2003; Fernández Honaine, 2007; Fernández Honaine *et al.*, 2009).

Las características morfológicas presentes en los fitolitos de sílice o silicofitolitos pueden ser informativas sobre las familias, géneros y en ocasiones especies de plantas que los generaron, así como de los diferentes órganos representados como hojas, inflorescencias, tallos, etc. (Piperno, 1988; Ollendorf, 1992; Mulholland y Rapp, 1992; Bozarth, 1992; Rosen y Weiner, 1994; Runge, 1999; Albert, 2000; Albert *et al.*, 2003). La morfometría de los fitolitos ha demostrado ser determinante para la identificación de gramíneas a nivel de subfamilias y en algunos casos a nivel de especies (Berlin *et al.*, 2003), razón por la cual es uno de los grupos más estudiados (Piperno, 1988). El análisis de asociaciones de fitolitos permite evaluar posibles cambios en la composición de una paleocomunidad de gramíneas a lo largo del tiempo a la vez que se vinculan con diferentes eventos climáticos (Twiss, 1992; Alexandre, 1999; Fredlund y Tieszen, 1994; Barboni *et al.*, 1999; Neumann *et al.*, 2009; 2015; Novello *et al.*, 2012; Rodríguez Antón, 2023).

El objetivo de esta investigación es (1) realizar la caracterización de las asociaciones fitolíticas de tres perfiles pedoestratigráficos representativos del Holoceno superior, ubicados en la sección media del valle de Santa María (Tucumán-Argentina); (2) inferir las condiciones ambientales reflejadas por tales asociaciones; y (3) integrar la información obtenida en el marco referencial regional y global. La información en conjunto proveerá nuevas evidencias y mayor resolución a las reconstrucciones paleoambientales existentes actualmente.

## MARCO GEOLÓGICO Y PALEOAMBIENTAL DEL VALLE DE SANTA MARÍA

El valle de Santa María (Fig. 1) se ubica en el Noroeste Argentino (NOA) y allí se distinguen, de modo general, dos sectores: a) la margen oriental del río Santa María constituida por la vertiente occidental de Cumbres Calchaquíes, dentro de la cual se encuentran las localidades de Molle Yaco y Yasyamayo; y b) la margen occidental del mismo río, constituida por la vertiente oriental de la Sierras de Quilmes, donde se ubica la localidad de El Pichao. Entre las sierras y el fondo del valle, existe un fuerte desnivel (4.200 a 1.600 metros sobre el nivel del mar [msnm]) y es recorrido por el río Santa María (Strecker, 1987; Peña Monné *et al.*, 2016).

Geológicamente, la zona es parte de las Sierras Pampeanas, compuesta por rocas metamórficas de bajo y mediano grado con intrusiones graníticas de edad precámbrica y cámbrica. En el piedemonte oriental se observan depósitos cenozoicos de diversas formaciones sedimentarias fluviales y lacustres, mientras que el occidental presenta depósitos fluviales cuaternarios de características torrenciales y eólicos (González *et al.*, 2000).

### Clima y precipitaciones

El clima actual presenta características áridas (según la clasificación de Köppen-Geiger) con precipitación media anual de 130–185 mm y temperatura media de 15–16 °C (Minetti, 2005). Los valores de evapotranspiración potencial son superiores a 700 mm por año (Pietragalla y Corso, 2008), siendo un ecosistema altamente sensible a los cambios ambientales que se han producido a lo largo del tiempo, en especial durante el Holoceno superior (Peña Monné *et al.*, 2015; Peña Monné y Sampietro Vattuone, 2016).

### Geomorfología

El valle es disimétrico, condicionado por la ocurrencia de fallas y el hundimiento de la parte central. En la margen oriental del valle los estudios geomorfológicos muestran cinco grandes niveles acumulativos pertenecientes al Pleistoceno (Strecker, 1987). Estos adoptan externamente la morfología de glacis o *pediments* y yacen discordantes sobre los depósitos del Terciario o Neógeno. En el sector tucumano de Cumbres Calchaquíes se han identificado solo tres niveles distintos de depósitos, separados por etapas de incisión que reflejan la sucesión de fases acumulativas seguidas de procesos de glaciplanación, alternantes con etapas intermedias de incisión como resultado de cambios climáticos cuaternarios, aunque sin descartar totalmente la influencia tectónica en este escalonamiento de formas

(Sampietro Vattuone y Neder, 2011). Durante el Holoceno se sucedieron etapas acumulativas y degradativas que permitieron la formación de abanicos aluviales cuya actividad se prolonga hasta la actualidad. Estos depósitos muestran estructuras sedimentarias fluviales, en algunos casos con predominio de acumulaciones de flujos de detritos (*debris flow*), mostrando una gradación de tamaños desde el piedemonte alto o ápice de los abanicos aluviales y las áreas distales y márgenes fluviales del rio Santa María, de composición dominantemente areno-arcillosa (Peña Monné y Sampietro Vattuone, 2016).

El margen occidental del valle se caracteriza por la presencia de abanicos aluviales coalescentes que se originan en la Sierra de Quilmes, identificándose relictos de edad pleistocena, aunque dominan aquellos formados durante el Holoceno superior. La dinámica general del área es muy activa presentando sectores de formación más reciente pertenecientes a la Pequeña Edad del Hielo (Peña Monné y Sampietro Vattuone, 2016).

## Suelos

Los suelos son en general de incipiente desarrollo, poco profundos, sin diferenciación de horizontes, con texturas predominantemente arenosas, poco estructurados, de colores claros muy homogéneos que evidencian escasos contenidos de materia orgánica. Además, en zonas cercanas al río Santa María, presentan un carácter salino-sódico alcalino predominante. En este sector, las sales están compuestas principalmente por cloruros y sulfatos sódicos y son una de las causas de la escasa cobertura vegetal que favorece la evaporación del agua y el ascenso de las sales desde profundidad, acumulándose en los horizontes superficiales (Perea, 1991). En los sectores con influencia fluvial del río Santa María, los suelos presentan una sucesión de discontinuidades con perfiles tipo A/C/2C/3C que fueron clasificados como Aridisoles (subgrupo Haplosalid típico) y en la planicie aluvial del río Amaicha se desarrollan entisoles pertenecientes al subgrupo torrifluvente típico. En los conos aluviales que descienden de la Sierra de Quilmes predominan Haplocalcides típicos (Puchulu y Fernández, 2014).

## Vegetación

Fitogeográficamente, el valle de Santa María está incluido en la provincia de Monte en donde predominan las plantas de tipo xerófilas. Aunque también hay bosques marginales de algarrobos y sauces (Cabrera, 1971, 1976; Escudero Martínez, 1991; Perea, 1991). Los fondos de valle muestran el desarrollo de bosques en galería relacionados con mantos freáticos. Están compuestos por ejemplares del género *Neltuma* (ex *Prosopis sensu* Hughes *et al.*, 2022; Catalano *et al.*, 2023) e incluyen a *Geoffroea decorticans*. También es posible identificar bosques formando galerías en los arroyos tributarios caracterizados por la presencia de *Acacia parasenegalia*, *Schinus molle* y *Salix humboldtiana* (Cabrera, 1976; Perea, 1995).

Las gramíneas forman parte de la estepa arbustiva e incluyen especies perennes y anuales. Entre las perennes se destacan *Digitaria californica* (Panicoideae), *Cortaderia speciosa* (Danthonioideae), *Sporobolus maximus* (Chloridoideae) y *Stipa* (Pooideae). Entre las especies anuales se encuentra *Munroa argentina* (Chloridoideae) (Cabrera, 1976; Carrizo y Grau, 2014). Estas especies se hallan entremezcladas con arbustos como *Zuccagnia punctata*, *Bulnesia schickendantzii*, *Allionia incarnata* y *Plectocarpa rougessi* (Cabrera, 1976).

## Evolución paleoambiental del Holoceno superior en el valle de Santa María

Existen registros morfosedimentarios que permitieron reconstruir la secuencia evolutiva del valle de Santa María (Strecker, 1987; Sayago *et al.*, 2012; Peña Monné *et al.*, 2015, entre otros) y del valle de Tafí (Sampietro Vattuone *et al.*, 2016; Peña Monné y Sampietro Vattuone, 2018, entre otros). Para ello se utilizaron datos geomorfológicos, secuencias sedimentarias, dataciones de 14C y OSL, información arqueológica y la presencia, si la hubiere, de paleosuelos y capas de cenizas volcánicas. Esta secuencia va desde el final del Pleistoceno hasta la actualidad y se encuentra integrada por cuatro fases agradativas separadas por procesos de incisión (Sampietro Vattuone *et al.*, 2016). Específicamente para el valle de Santa María, se establecen alternancias de períodos húmedos y secos a lo largo de los últimos 2.800 años. Durante las fases más húmedas la estabilidad geomorfológica fue suficiente para permitir el desarrollo de suelos y una mejor cobertura vegetal, favoreciendo la ocupación humana principalmente durante *ca.* 1.900–1.000 AP. Se destacan los períodos húmedos

establecidos regionalmente hacia 4.800–4.500 AP, periodo intermedio Romano (1.920–1.720 AP) y la LALIA o *Late Antique Little Ice Age* (1.464–1.340 AP), mientras que las fases secas abarcan la Época Romana y la Anomalía Cálida Medieval (1.000 AP). Por otra parte, para el último milenio se reconocen fases de reactivación de dunas en torno a los años, 650, 350 y 230 AP (Peña Monné *et al.*, 2015) separadas por fluctuaciones más húmedas. Si bien se conocen estas fluctuaciones paleoambientales y cambios en el uso del suelo vinculados a ocupaciones humanas sucesivas, no existe información sobre la dinámica de la vegetación a lo largo del período.

En lo que respecta a los antecedentes en el tema, se destacan las investigaciones realizadas en El Bolsón

**Figura 1.** Ubicación geográfica de las localidades en estudio: **1,** Molle Yaco; **2,** Yasyamayo; **3,** El Pichao. Escala gráfica= 10 km.

(Departamento de Belén, Provincia de Catamarca). Allí, las condiciones ambientales fueron relativamente más húmedas *ca*. 500 AP, mientras que la aridez se incrementó entre el 1.500 y el 800 AP (Kulemeyer *et al*., 2013). En otra localidad (Caspinchango) dentro de la misma provincia, se analizaron conjuntos fitolíticos procedentes de un sondeo efectuado en una terraza agrícola (Lanzelotti, 2012). Allí, la Zona I o inferior del perfil está dominada por elementos graminoides que reflejan una vegetación herbácea de características climáticas frías. Mientras que la Zona II o superior del perfil presenta fitolitos pertenecientes a las subfamilias Panicoideae, Chloridoideae (gramíneas), como así también Bambusoideae (gramíneas) y Arecoideae (palmeras), indicando una vegetación de características más cálidas y menor disponibilidad hídrica (Lanzelotti y Zucol, 2019).

## MATERIALES Y MÉTODOS

En el presente trabajo se seleccionaron tres localidades dentro del valle de Santa María que reflejan las características anteriormente expuestas: (1) La localidad Molle Yaco (perfil MY-P2, Tab. 1) se encuentra en el piedemonte occidental de las Cumbres Calchaquíes (Fig. 1), en uno de los abanicos aluviales de Etapa S6 formados

**TABLA 1 – Perfiles de las tres localidades muestreadas y descripción de las muestras que componen cada perfil.**

| Perfil Ubicación | Muestras | Prof. (cm) | pH | Textura | Color | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | Seco | Húmedo |
| Molle Yaco | | | | | | |
| (MY-P2) 26°32'45" S 65°49'25" O 2.624 msnm | MY-P2-AC | 0-12 | 7,9 | Franco arcillo arenosa | 10 YR 5/3 | 10 YR 3/3 |
| | MY-P2-C | 12-24 | 8,4 | Franco arcillo arenosa | 10 YR 5/3 | 10 YR 3/2 |
| | MY-P2-C1 | 24-26 | 8,4 | Franco arcillo arenosa | 10 YR 3/3 | 10 YR 2/2 |
| | MY-P2-C2 | 26-30 | 8,3 | Arcillo limosa | 10 YR 4/6 | 10 YR 3/6 |
| Yasyamayo | | | | | | |
| (Y-P1) 26°27'55" S 65°50'04" O 2.233 msnm | Y-P1-C1 | 0-10 | 8,4 | Franco arcillo limosa | 2,5 Y 6/3 | 2,5 Y 4/4 |
| | Y-P1-C2 | 10-20 | 8,6 | Franco arcillo limosa | 2,5 Y 6/2 | 2,5 Y 4/4 |
| | Y-P1-C3 | 20-30 | 8,9 | Franco arcillo limosa | 2,5 Y 6/2 | 2,5 Y 4/4 |
| | Y-P1-C4 | 30-40 | 8,7 | Franco limosa | 2,5 Y 7/3 | 2,5 Y 4/4 |
| | Y-P1-C5 | 40-50 | 8,9 | Franco arcillo limosa | 2,5 Y 7/3 | 2,5 Y 4/3 |
| | Y-P1-C6 | 50-60 | 9 | Franco limosa | 2,5 Y 7/3 | 2,5 Y 4/3 |
| El Pichao | | | | | | |
| (P-P1) 26°22'5,2" S 66°01'17" O 2.032 msnm | P-P1-C1 | 0-10 | 8 | Areno franco | 10 YR3/4 | 10 YR 2/2 |
| | P-P1-C2 | 10-20 | 6,5 | Arenoso | 10 YR 4/1 | 10 YR 3/2 |
| | P-P1-C3 | 30-40 | 6 | Areno franco | 10 YR 4/3 | 10 YR 2/1 |
| | P-P1-C4 | 40-50 | 8 | Arenoso | 10 YR 4/2 | 10 YR 2/2 |
| | P-P1-C5 | 50-60 | 7,5 | Areno franco | 10 YR 4/3 | 10 YR 2/2 |
| | P-P1-C6 | 60-70 | 8,5 | Areno franco | 10 YR 4/3 | 10 YR 2/1 |
| | P-P1-C7 | 70-80 | 8 | Areno franco | 10 YR 3/4 | 10 YR 2/2 |
| | P-P1-C8 | 80-90 | 8 | Arenoso | 10 YR 3/4 | 10 YR 2/2 |

durante el Holoceno superior (Sampietro Vattuone y Peña Monné, 2023). Desde el punto de vista fisicoquímico, la textura del perfil seleccionado oscila entre franco-arcillo arenoso a arenoso y el contenido de materia orgánica oscila entre pobre y extremadamente pobre, aunque es de calidad buena a muy buena (Sampietro Vattuone *et al.*, 2014). (2) La localidad Yasyamayo (perfil Y-P1, Tab. 1) también se ubica en el piedemonte occidental de las Cumbres Calchaquíes (Fig. 1). Está en un nivel intermedio del glacis de Etapa S5, producto de la acumulación de flujos de detritos de alta competencia con matriz limosa y bloques de tamaño diverso formados durante el Holoceno inferior/medio (Sampietro Vattuone y Peña Monné, 2023). La secuencia estratigráfica presenta una textura desde arcillo limosa a limosa, el porcentaje de materia orgánica es elevado y los valores de pH (entre 7 y 14) aumentan a mayor profundidad (Roldan,

**TABLA 2 – Morfotipos fitolíticos utilizados en el presente trabajo.**

| Código [a] | Descripción | Grupo [b] | Denominación propuesta por el ICPN | Afinidad botánica |
|---|---|---|---|---|
| ACU_BUL01, ACU_BUL02, ACU_BUL03, ACU_BUL04, ACU_BUL05 | Elementos aguzados de diferentes tamaños a veces con forma de gancho | Aguzados | Acute Bulbosus | Familia Poaceae |
| BLO | Elementos poliédricos de gran tamaño | Poliédricos | Blocky | Familia Poaceae |
| BUL_FLA01, BLU_FLA02, BLU_FLA03, BLU_FLA04 | Elementos en forma de abanico de diferentes tamaños, a veces con márgenes convexos y facetados | Flabelos | Bulliform Flabelatte | Familia Poaceae |
| ELO_ENT | Elementos elongados de contorno liso | Elongados | Elongate Entire | No diagnósticos |
| ELO_SIN01, ELO_ENT02 | Elementos elongados de contorno sinuoso de distintos tamaños y grosos | Elongados sinuosos | Elongate Sinuate | No diagnósticos |
| ELO_DET | Elementos elongados con bordes dentados | Elongados dentados | Elongate Dentate | No diagnósticos |
| ELO_DEN | Elementos elongados con bordes dendríticos | Elongados dendríticos | Elongate Dendritic | No diagnósticos |
| SAD01, SAD02, SAD03, SAD04 | Células cortas en forma de silla de montar, con caras cóncavas o convexas | En forma de silla de montar | Saddle | Subfamilia Chloridoideae |
| BIL01, BIL02, BIL03, BIL04, BIL05, BIL06, BIL07, BIL08 | Se incluyen aquí todas las células cortas en forma de halterios o con dos lóbulos independientemente de la orientación de ambos | Bilobados | Bilobate | Subfamilia Panicoideae |
| POL01, POL02, POL03, POL04 | Células cortas en forma de halterios polilobados o con más de dos lóbulos | Polilobados | Polylobate | Subfamilia Chloridoidae |
| CRO01, CRO02 | Células cortas con cuatro lóbulos y doble simetría en espejo | Cruces | Cross | Subfamilia Chloridoideae |
| RON01, RON02, RON03 | Células en forma de conos truncados largos | Conos truncados | Rondel | Subfamilia Pooideae |
| TRZ | Células cortas redondeadas, a veces crenadas sin facetas | Trapezoidal | Trapezoid | Subfamilia Festucoideae/Pooideae |

Referencias: (a) Neumann *et al.* (2019); (b) Bertoldi de Pomar (1971). Los números que siguen al código corresponden a las variaciones de formas dentro de un mismo tipo de fitolito.

2014). (3) La localidad El Pichao (perfil P-P1, Tab. 1) está ubicada en el piedemonte oriental de la Sierra de Quilmes (Fig. 1) sobre un abanico aluvial perteneciente a la etapa H2 del Holoceno superior datada entre *ca.* 6.600 y 1.350 AP (Peña Monné y Sampietro Vattuone, 2016). La textura de los sedimentos es muy homogénea con una fracción fina muy baja dominando las clases texturales arenosa, areno-franca y excepcionalmente franco-arenosa y franca. Los niveles de pH tienden a ser ligeramente alcalinos (Lefebvre *et al.*, 2021).

Para la toma de muestras se realizaron calicatas de un metro de lado en ubicaciones representativas geomorfológicamente de las condiciones ambientales locales. En total se obtuvieron 18 muestras de sedimento, cada una identificada por perfil y su ubicación en el mismo (Tab. 1). Cuando fue posible, se registraron las características pedológicas siguiendo la propuesta de *World Reference Base for Soil Resources* (IUSS Working Group WRB, 2022). Se tomaron muestras cada 10 cm de profundidad y enumeradas de arriba hacia abajo.

Para la extracción de fitolitos las muestras se centrifugaron en politungstato de sodio después de un tratamiento preliminar según Zucol *et al.* (2010). Se seleccionó únicamente la fracción fina (4–53 µm) por ser la que contenía los fitolitos y se la montó en un medio fijo (Bálsamo de Canadá) para la observación microscópica. Después de contar alrededor de 400 fitolitos por muestra, los datos fueron analizados comparativamente y graficados en diagramas fitolíticos mediante la utilización del paquete de software POLPAL v.2009 (Walanus y Nalepka, 1999, 2002). Este permitió también realizar un análisis de clúster conocido como *Constrained Incremental Sum of Squares* (CONNIS) (Grimm, 1987). Los análisis comparativos se realizaron mediante la confección de una Matriz Básica de Datos (Información Suplementaria online) que sirvió para los análisis estadísticos multivariados utilizando el programa PAST v.4.06b (Paleontological STatistics) (Hammer *et al.*, 2007), a la cual se le aplicó un Análisis de Componentes Principales (ACP).

La caracterización de cada morfotipo fitolítico se realizó siguiendo los criterios de Bertoldi de Pomar (1971), Twiss (1992), Kondo *et al.* (1994), Zucol (1996) y Patterer *et al.* (2011), junto a la propuesta ICPN 2.0 (Neumann *et al.*, 2019). Con esta información se elaboró una tabla con la clasificación de cada uno de ellos, que luego fueron utilizados en los diagramas fitolíticos (Tab. 2).

Se analizaron morfotipos originados en las células epidérmicas de gramíneas por ser informativos desde el punto de vista paleoambiental (Twiss *et al.*, 1969; Kondo *et al.*, 1994), como por ejemplo los fitolitos en forma de abanico y los poliédricos. También se consideraron los fitolitos elongados originados en células largas epidérmicas (Twiss *et al.*, 1969; Mulholland, 1989; Twiss, 1992; Fredlund y Tieszen, 1994; Kondo *et al.*, 1994). Dentro de las formas con mayor valor diagnóstico, se describieron fitolitos bilobados pertenecientes a la subfamilia Panicoideae y en forma de sillas de montar que son producidos por la subfamilia Chloridoideae. Por último, se encuentran los conos truncados, torres y crenados que son producidos por las subfamilias Arundinoideae/Danthonioideae y por la subfamilia Pooideae (Twiss *et al.*, 1969; Mulholland, 1989; Twiss, 1992; Fredlund y Tieszen, 1994; Kondo *et al.*, 1994). La clasificación sistemática de Poaceae sigue la propuesta de Soreng *et al.* (2022).

## RESULTADOS

Las descripciones fitolíticas de cada perfil se basaron en las variaciones de abundancia y diversidad de cada morfotipo. Se pudieron diferenciar fitolitos graminoides de gran tamaño (mayores a 20 µm) como los elongados, flabelados, aguzados y poliédricos (Fig. 2).

Mientras que entre los de tamaño menor (menores a 20 µm) y de alto valor diagnóstico para la familia de las Poaceae se destacaron bilobados, polilobados, cruces, sillas de montar y conos truncados (Fig. 3).

En el caso de la localidad Molle Yaco, el perfil MY-P2 cuenta con una potencia de 30 cm de profundidad y cuatro muestras (Tab. 1). El análisis del clúster ha permitido establecer dos secciones que, de base a techo, son: sección inferior (MY-P2-S1) formada por las asociaciones fitolíticas de las capas C2, C1 y C; y la sección superior (MY-P2-S2) que incluye a las asociaciones fitolíticas de la capa AC. La sección MY-P2-S1 (inferior) se caracterizó por la presencia de elementos graminoides de gran tamaño como elementos aguzados, elongados, flabelados y poliédricos entre los más numerosos. Dentro de las formas diagnósticas de gramíneas, de tamaño menor que las anteriores, se destacó

**Figura 2.** Fitolitos diagnósticos de la familia Poaceae de gran tamaño y células epidérmicas (mayor a 20µm): **1–4,** células epidérmicas elongadas; **5–7,** aguzados; **8–9,** flabelados. Escala= 20µm.

la presencia de bilobados, polilobados y cruces, afines a Panicoides. Además, se observaron de manera frecuente células crenadas y conos truncados largos de afinidad Pooides. La sección MY-P2-S2 (superior) presentó los mismos morfotipos descritos para la sección inferior, en la cual los fitolitos aguzados, elongados, flabelados y poliédricos resultaron muy frecuentes. En contraste, los elementos en forma de silla de montar resultaron escasos, mientras que las formas bilobadas fueron frecuentes. En esta sección también se encontraron fitolitos crenados, afines a Pooides, y conos truncados largos en menor cantidad que la sección MY-P2-S1 (Fig. 4).

En la localidad de Yasyamayo, el perfil Y-P1 cuenta con una potencia de 60 cm de profundidad y está compuesto por seis muestras (Tab. 1). El clúster dividió el perfil en dos secciones: una sección inferior (Y-P1-S1) formada por las asociaciones fitolíticas de las capas C6 y C5; y la sección superior (Y-P1-S2), que incluye a las asociaciones de las capas C4, C3, C2 y C1 (Fig. 5). La sección Y-P1-S1 se caracterizó por presentar morfotipos elongados lisos, sinuosos, dentados y poliédricos. Se destacaron, además, las formas bilobadas, sillas de montar y conos truncados largos. Mientras que las cruces y los elementos polilobados son escasos. La sección Y-P1-S2 se caracterizó por presentar morfotipos en forma cruz, bilobados, sillas de montar y conos truncados, entre las células cortas con valor diagnóstico. Sin embargo, a mayor profundidad los elementos en forma de silla montar se distribuyen de manera muy frecuente, mientras que los bilobados, cruces y polilobados son escasos (Fig. 5).

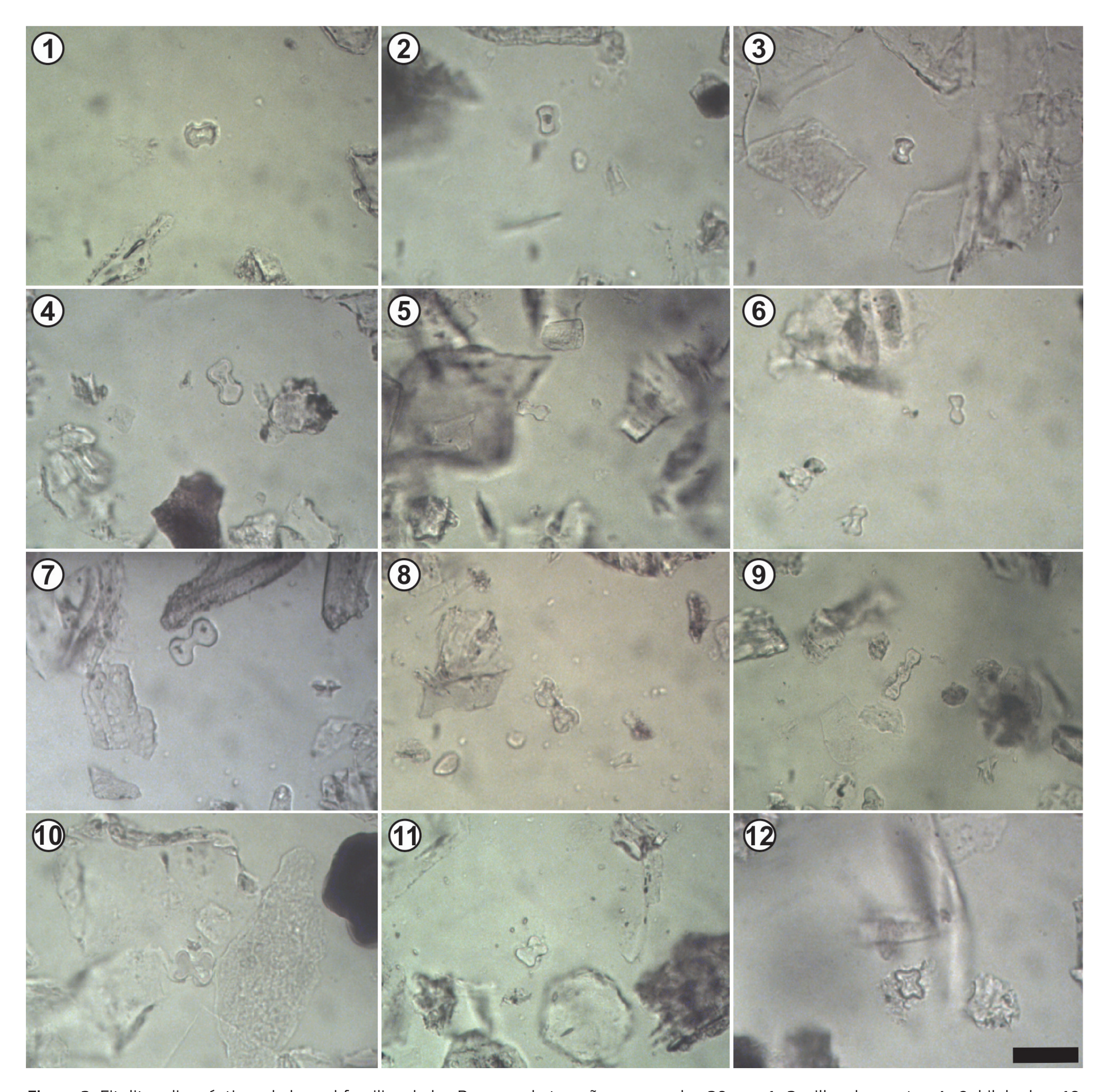



**Figura 3.** Fitolitos diagnósticos de las subfamilias de las Poaceae de tamaño menor a los 20 μm: **1–3,** sillas de montar; **4–9,** bilobados; **10,** polilobados; **11–12,** en forma de cruz. Escala= 20μm.

El perfil El Pichao (P-P1) cuenta con una potencia de 80 cm de profundidad y ocho muestras (Tab. 1). Al igual que en los otros dos perfiles, el análisis de clúster (CONISS) dividió al P-P1 en dos secciones: la sección inferior (P-P1-S1) formada por la capa C8; y la superior (P-P1-S2) formada por las demás capas donde se pueden identificar las subsecciones P-P1-S2a (C7 a C5), P-P1-S2b (C4 a C2) y finalmente P-P1-S2c (C1) (Fig. 6). La P-P1-S1 se caracterizó por la presencia muy frecuente de elementos aguzados, flabelados, elongados de contorno liso, dentados y ondulados. Abundaron los fitolitos bilobados y cruces; las sillas de montar disminuyen en comparación con los fitolitos redondeados y conos truncados. Los rasgos comunes de toda la P-P1-S2 son la presencia de fitolitos aguzados, flabelados, elongados y poliédricos entre las formas de mayor tamaño. Mientras que entre los fitolitos de tamaño

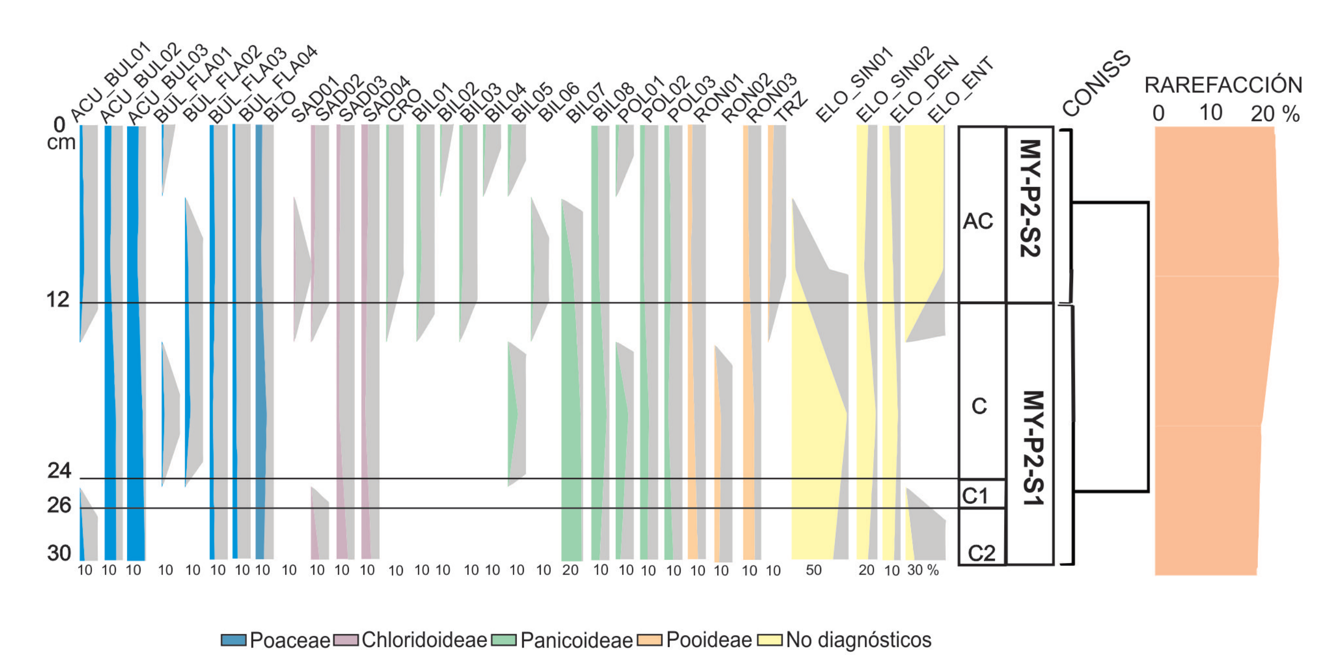



**Figura 4.** Diagrama fitolítico del perfil MY-P2 que incluye el resultado del análisis multivariado *Constrained Incremental Sum of square analysis* (CONISS) y rarefacción de estas asociaciones. Valores (en recuentos): en color celeste pastel la abundancia relativa de la familia Poaceae; en otros colores las abundancias relativas discriminadas por subfamilias de Poaceae.

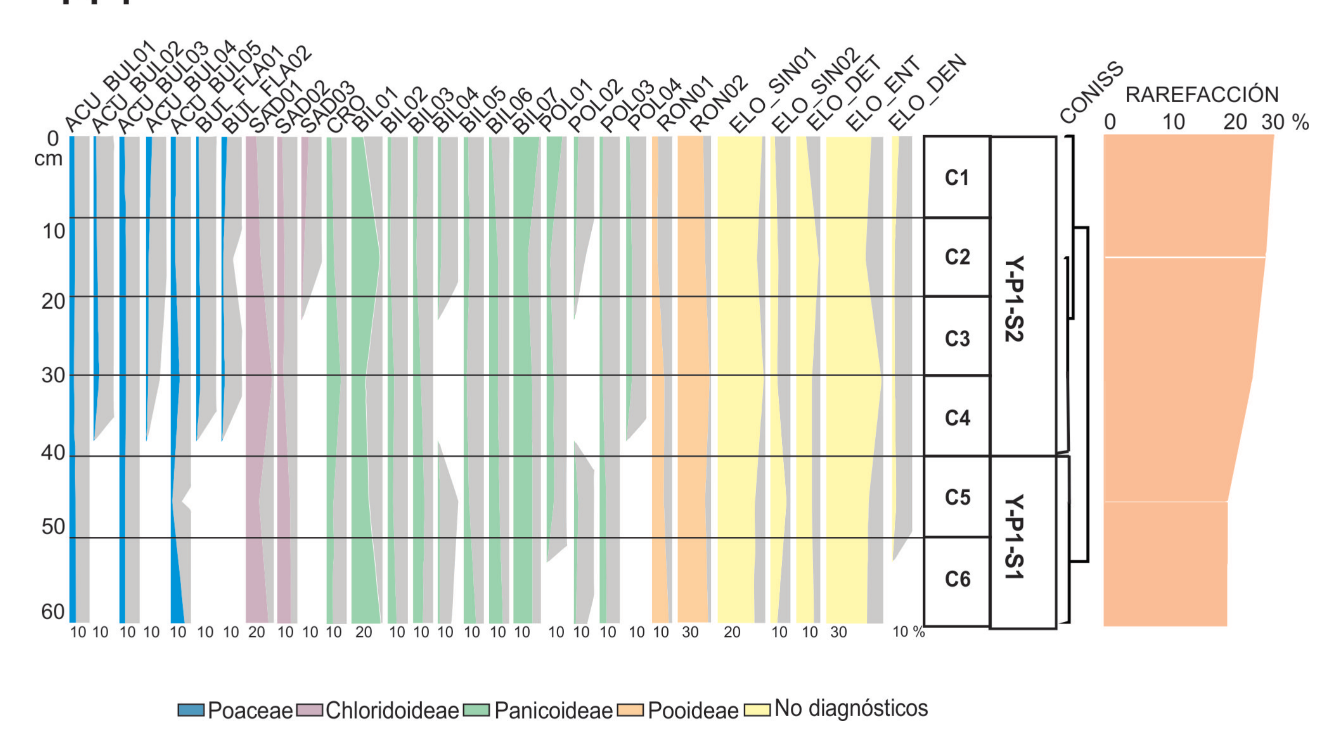



**Figura 5.** Diagrama fitolítico del perfil Y-P1 que incluye el resultado del análisis multivariado *Constrained Incremental Sum of square analysis* (CONISS) y rarefacción de estas asociaciones. Valores (en recuentos): en color celeste pastel la abundancia relativa de la familia Poaceae; en otros colores las abundancias relativas discriminadas por subfamilias de Poaceae.

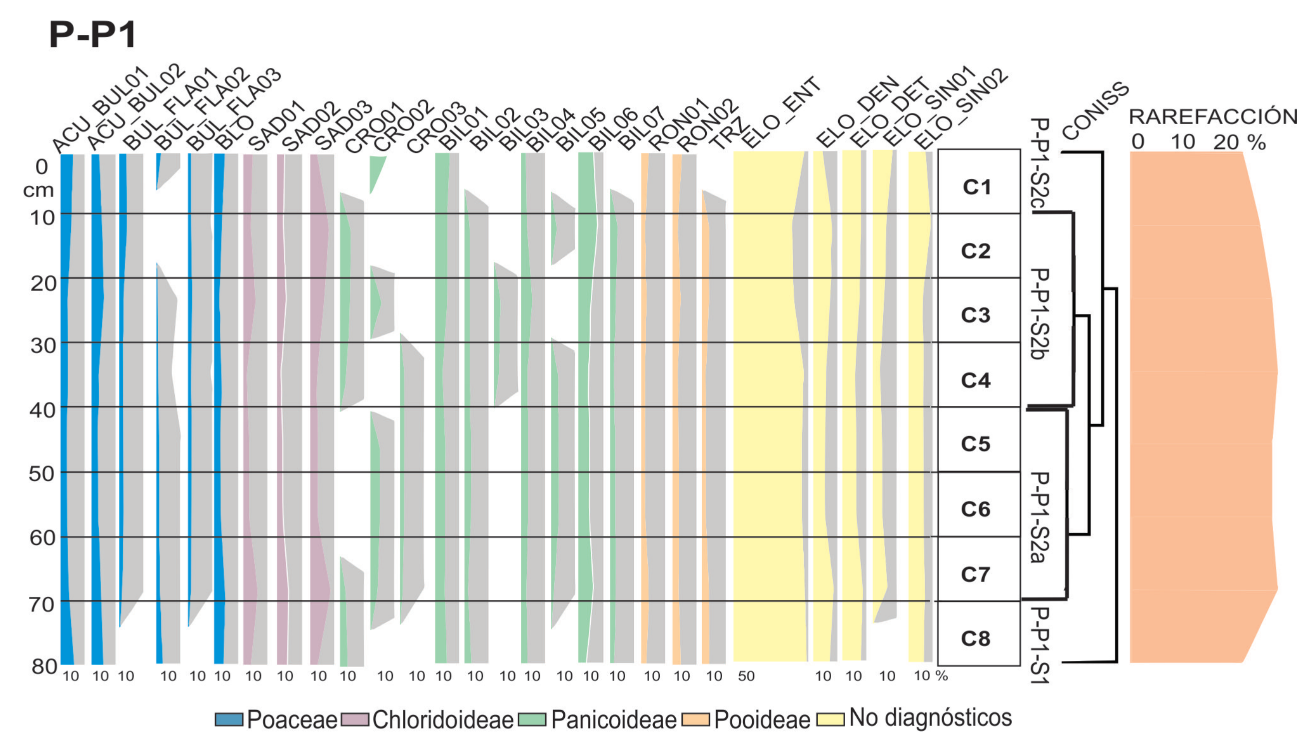



**Figura 6.** Diagrama fitolítico del perfil P-P1 que incluye el resultado del análisis multivariado *Constrained Incremental Sum of square analysis* (CONISS) y rarefacción de estas asociaciones. Valores (en recuentos): en color celeste pastel la abundancia relativa de la familia Poaceae; en otros colores las abundancias relativas discriminadas por subfamilias de Poaceae.

menor se encontraron cruces, bilobados, sillas de montar y conos truncados. Cada subsección tiene características distintivas. En el caso de la subsección P-P2-S2a, los elementos aguzados, flabelados, elongados lisos, dentados, ondulados y fitolitos poliédricos se distribuyeron de manera muy frecuente. Mientras que dentro de las células cortas son frecuentes fitolitos en forma de sillas de montar, bilobados, cruces y conos truncados cortos. La subsección P-P2-S2b se diferencia de la anterior por la disminución en la abundancia de morfotipos bilobados, cruces y conos truncados. Comparados con estos, las sillas de montar disminuyeron aún más su número. Por último, en la sección P-P2-S2c, las formas bilobadas y cruces disminuyeron mientras que las sillas de montar aumentaron, a diferencia de lo que sucede en la sección anterior, donde se da la situación inversa (Fig. 6).

El análisis realizado permitió dividir las secuencias en secciones en función de su contenido fitolítico. Como ya se mostró más arriba, estas contienen asociaciones fitolíticas que indican cambios en la vegetación a lo largo del tiempo.

El ACP se realizó en todos los perfiles, considerando abundancia relativa y diversidad de morfotipos. El componente 1 explicó el 37% de la variabilidad, mientras que el componente 2 explicó el 29% (Fig. 7).

Los tres perfiles aparecen separados, en tanto Molle Yaco y Yasyamayo se encuentran localizados en un sector relativamente más árido del valle, caracterizado por un fenómeno de sombra de lluvias producido por las Cumbres Calchaquíes (Fig. 1). En contraste, El Pichao está expuesto al este con una posición más favorable para la recepción de vientos húmedos del este y sudeste y con un aumento leve de las precipitaciones anuales.

En todos los casos, el análisis de clúster (CONISS) divide secciones (o subsecciones) superiores que se separan del resto de las muestras de cada perfil (Fig. 7). Pone en relevancia la diferencia entre la vegetación de la vertiente occidental y oriental del valle. Sin embargo, la evolución general de la vegetación localmente refleja diferencias asociadas con las mismas tendencias ambientales anteriores. La sección P-P1-S1 incluye las capas infrayacentes a la ocupación humana. Se estima que la edad de dicha capa estaría comprendida en torno a los inicios de la era cristiana. Las

asociaciones fitolíticas encontradas aquí muestran que el ambiente era de tendencia templado y frío. Esto es coincidente con lo descripto en Molle Yaco para la sección MY-P2-S1, en donde son frecuentes los fitolitos pertenecientes a las subfamilias Panicoideae, Pooideae y en menor medida Chloridoideae.

## DISCUSIÓN

A partir de la presente investigación se ha podido obtener información relevante sobre los cambios paleoambientales ocurridos durante el Holoceno superior en el área del Valle de Santa María. Se trabajó con tres perfiles ubicados en diferentes localidades con fines comparativos. Las muestras extraídas corresponden a sedimentos predominantemente gruesos (Sampietro Vattuone *et al*., 2014; Lefebvre *et al*., 2021), pero aparentemente esto no influyó de manera significativa en la degradación de los fitolitos identificados. Los pHs tienden a ser alcalinos y en general se encuentran en un rango entre 5 y 9, lo cual asegura la conservación de estos microrrestos en los sedimentos (Piperno, 1988; Hart y Humphreys, 2003; Albert *et al*., 2006).

Las secciones superiores de los tres perfiles reflejan las asociaciones fitolíticas representativas de las condiciones ambientales actuales (temperatura media anual de 15–16 °C y 130–185 mm de precipitaciones) que son diferentes a las pretéritas subyacentes. Ofreciendo éstas indicios de que la vegetación ha cambiado a lo largo del tiempo en el valle, con matices propios de la posición orográfica de cada perfil muestreado. Así, la vegetación actual en Molle Yaco y Yasyamayo corresponde predominantemente a plantas arbustivas como *Larrea cuneifolia*, *L. divaricata* y *Bulnesia schickendantzii*. Árboles como *Acacia visco*, *Schinus molle* y *Salix humboldtiana* que forman los bosquecitos de quebrada y diferentes especies del género *Neltuma* que constituyen

**Figura 7.** Análisis de componentes principales de los tres perfiles analizados. El primer componente explica el 37% de la variabilidad, mientras que el componente dos, explica el 29%. Círculo rojo: MY-P2, estrella azul: Y-P1 y cuadrado amarillo: P-P1. **a,** Similitud de muestras superficiales MY-P2 y Y-P1; **b,** localización de la muestra P-P1-C1 correspondiente a la subsección P-P1-S2c del perfil de Pichao; **c,** muestras de la sección MY-P2-S1 de Molle Yaco; **d,** muestras de la sección Y-P1-S1 de Yasyamayo; **e,** muestras sección Y-P2Sa.

los bosques en galería. Las gramíneas forman parte de la estepa arbustiva e incluyen a especies como *Digitaria californica* (Panicoideae), *Cortaderia speciosa* (Danthonioideae), *Sporobolus maximus* (Chloridoideae), *Stipa* (Pooideae) y *Munroa argentina* (Chloridoideae) (Cabrera, 1976; Carrizo y Grau, 2014). Esta vegetación se encuentra representada en las secciones MY-P2-S2 y Y-P1-S2, están próximas entre sí en el ACP (Fig. 7.1). Las asociaciones fitolíticas que se encontraron en Molle Yaco son afines a las subfamilias Panicoideae y Pooideae, propias de ambientes subtropicales con aporte de humedad. Mientras que en Yasyamayo se destacan asociaciones de afinidad Chloridoide y Panicoide, lo que daría cuenta de un ambiente fundamentalmente árido. Las diferencias entre ambas pueden estar dadas por el desarrollo de lo que Perea (1995) denominó Bosquecitos de Quebrada en zonas restringidas a cursos con agua permanente en el sector de Molle Yaco, que se encuentran ausentes en Yasyamayo, donde predomina el jarillal (*Larrea* spp.) (Perea, 1995). Estas secciones se caracterizan por el aumento de fitolitos bilobados, cruces y polilobados, acompañados por la disminución de los elementos en forma de sillas de montar, en relación a las secciones subyacentes (Figs. 4–5). Si bien de acuerdo al análisis de clúster estas secciones se diferencian de las infrayacentes, el ACP las representa próximas entre sí, es decir Y-P1-C1 con Y-P1-C2 por un lado y MY-P2-AC con MY-P2-C, por el otro. Tratándose, probablemente, de situaciones transicionales desde condiciones ambientales francamente distintas a las actuales (Fig. 7, muestras Y-P1-C2 y MY-P2-C). Con respecto al perfil de El Pichao, la subsección P-P1-S2c, contiene fitolitos en forma de sillas de montar que aumentan hacia la base del perfil, mientras que los bilobados y cruces disminuyen en relación a las muestras infrayacentes (Fig. 6). Esta subsección representa las condiciones ambientales actuales, las cuales están dominadas por gramíneas herbáceas como: *Aristida adscencionis* (Aristidoideae), *Chloris* sp., *Munroa argentina* (Chloridoideae) y *Panicum urvilleanum* (Panicoideae) (Cano, 2011).

El ACP muestra información acerca de rasgos evolutivos paleoambientales marcadamente diferentes para las secciones más profundas de los perfiles de Molle Yaco y Yasyamayo (Fig. 7). Si bien ambos carecen de materiales datables por medios absolutos, se encuentran ubicados en los márgenes de sitios arqueológicos con material cerámico de edad conocida (Roldán, 2014; Sampietro Vattuone *et al.*, 2014). Las correlaciones estratigráficas realizadas (Fig. 8) permiten establecer que la sección MY-P2-S1 corresponde, como edad mínima, a la etapa de ocupación humana del período Formativo en la región, estimada entre *ca.* 1.900–1.000 AP (Roldán, 2014; Sampietro Vattuone *et al.*, 2014; Lefebvre, 2021). En el caso de Yasyamayo, aplicando la misma metodología, la edad mínima estimada para la sección Y-P1-S2a corresponde al período de Desarrollos Regionales (*ca.* 1.900–500 AP) (Roldán, 2014; Lefebvre, 2021). Por último, las correlaciones estratigráficas de El Pichao (Fig. 8) indican que la sección P-P1-S2a corresponde al período de ocupación humana, que en el sitio se inició durante el Formativo (Núñez Regueiro y Tartusi, 1993). Es particularmente intenso durante el período de Desarrollos Regionales (Cornell y Johansson, 1993) y continuó ocupado incluso durante el Hispano Indígena (Stenborg, 2002). Por lo tanto, esta sección del perfil es posterior al 1.900 AP y como máximo se extiende hasta 340 AP, aunque lo más probable es que sea contemporánea con el período de Desarrollos Regionales.

Desde el punto de vista paleoambiental, reconstrucciones previas realizadas en la región mediante indicadores geomorfológicos, estratigráficos, pedológicos y arqueológicos (Peña Monné *et al.*, 2015; Peña Monné y Sampietro Vattuone, 2016, 2018; Sampietro Vattuone *et al.*, 2018) han permitido establecer que existieron alternancias de períodos húmedos y secos a lo largo de los últimos 3.000 años, durante el Holoceno superior (Fig. 9.1). En este lapso temporal destacan un período particularmente húmedo y probablemente frío que permitió el desarrollo de suelos en la región, datados en torno a *ca.* 4.500 AP (Sampietro Vattuone, 1999; Sampietro Vattuone y Peña Monné, 2016) relacionados con el Evento Bond 2.8 (Bond *et al.*, 1997) de alcance global (Fig. 9.1). Sobre estos suelos se asentaron las primeras comunidades sedentarias de la región durante el período Formativo. Las asociaciones fitolíticas encontradas se corresponderían, mayormente, con la subfamilia Panicoideae. En menor medida se encuentran elementos pertenecientes a las subfamilias Pooideae y Chloridoideae. Estas asociaciones se describen en la sección MY-P2-S1 (Fig. 7.3) y serían probablemente contemporáneas con esta

época y correlacionables con las estimaciones realizadas para la zona (Fig. 9.3).

La sección inferior de Yasyamayo (Y-P1-S1) está representada por una asociación fitolítica con elementos afines a las subfamilias Panicoideae, Chloridoideae y Pooideae. Esta sección podría indicar el desarrollo de episodios cálidos alternantes con eventos fríos y húmedos, representada en el ACP por las muestras Y-P1-C5 y C6 (Fig. 7.4). Considerando que esta sección tiene una edad mínima relativa anterior a *ca.* 1.000 AP, es probable que las asociaciones fitolíticas estén reflejando las condiciones del período Cálido Romano (Campbell *et al.*, 1998) y la Pequeña Edad de Hielo de la Antigüedad Tardía (LALIA). Esta refleja un período de enfriamiento global datado entre *ca.* 1.464 y 1.340 AP (Büntgen *et al.*, 2016), en concomitancia con las sugerencias relativas a la evolución paleoambiental regional propuestas por Sampietro Vattuone *et al.* (2018).

La subsección Y-P1-S2a se caracteriza por presentar fitolitos de afinidad Chloridoideae que describen un ambiente de características más áridas y cálidas que las actuales. Las inferencias ambientales para esta sección serían coincidentes a las descriptas para las fases secas de

MY-P2 | P-P1 | Y-P1

AC, C, C1, C2 | C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8 | C1, C2, C3, C4, C5, C6

MY-P2-S2 / P-P1-S2c
MY-P2-S1 / P-P1-S1
P-P1-S2c / Y-P1-S2
P-P1-S2b
P-P1-S2a / Y-P1-S2
Y-P1-S1

0 cm
20
40

Actualidad
Pequeña Edad del Hielo (*ca.* 700—150 AP)
Anomalía Cálida Medieval (*ca.* 1000—700 AP)
Bond 2.8, Fase Fría de la Edad del Hierro (*ca.* 2800—2600 AP)
Cálido Romano y LALIA (*ca.* 2500—1200 AP)

**Figura 8.** Correlación estratigráfica entre los perfiles descriptos.

la Anomalía Cálida Medieval, datada globalmente en torno a 1.000 AP (Fig. 8). Esta hipótesis se refuerza si se consideran otros perfiles estudiados en el valle pero que contienen rasgos antropizados (terrazas agrícolas). Entre estos se mencionan los descriptos por Lanzelotti (2012), Lanzelotti y Zucol (2019) y Lefebvre (2021), donde también abundan fitolitos megatérmicos en secuencias correlacionables estratigráficamente. Por otra parte, en la zona de Cafayate, unos 10 km al noroeste, se registran eventos de activación dunaria datados por OSL en 990 ± 80–220 ± 80 AP (Peña Monné *et al.*, 2015; Sampietro Vattuone *et al.*, 2018) intercalados con momentos más húmedos de estabilización de las dunas (Fig. 9.5). Las oscilaciones frío húmedo/seco posterior al 700 AP se enmarcan globalmente dentro de las oscilaciones típicas de la Pequeña Edad del Hielo (Sampietro Vattuone *et al.*, 2018). Mientras que la primera activación dunaria ha sido asimilada a la Anomalía Cálida Medieval (Peña Monné *et al.*, 2015). Incluso en la zona se han detectado momentos de suficiente humedad y estabilidad ambiental para promover la formación de suelos datados por radiocarbono en 1.597 ± 18 AP (Maldonado *et al.*, 2016) y 1.565 ± 15 AP (Fig. 9.4–5). Esta fase fría de la Pequeña Edad del Hielo no ha sido identificada ni en Molle Yaco ni en Yasyamayo.

La subsección P-P1-S2a, contemporánea con las ocupaciones, se caracteriza por la predominancia de fitolitos

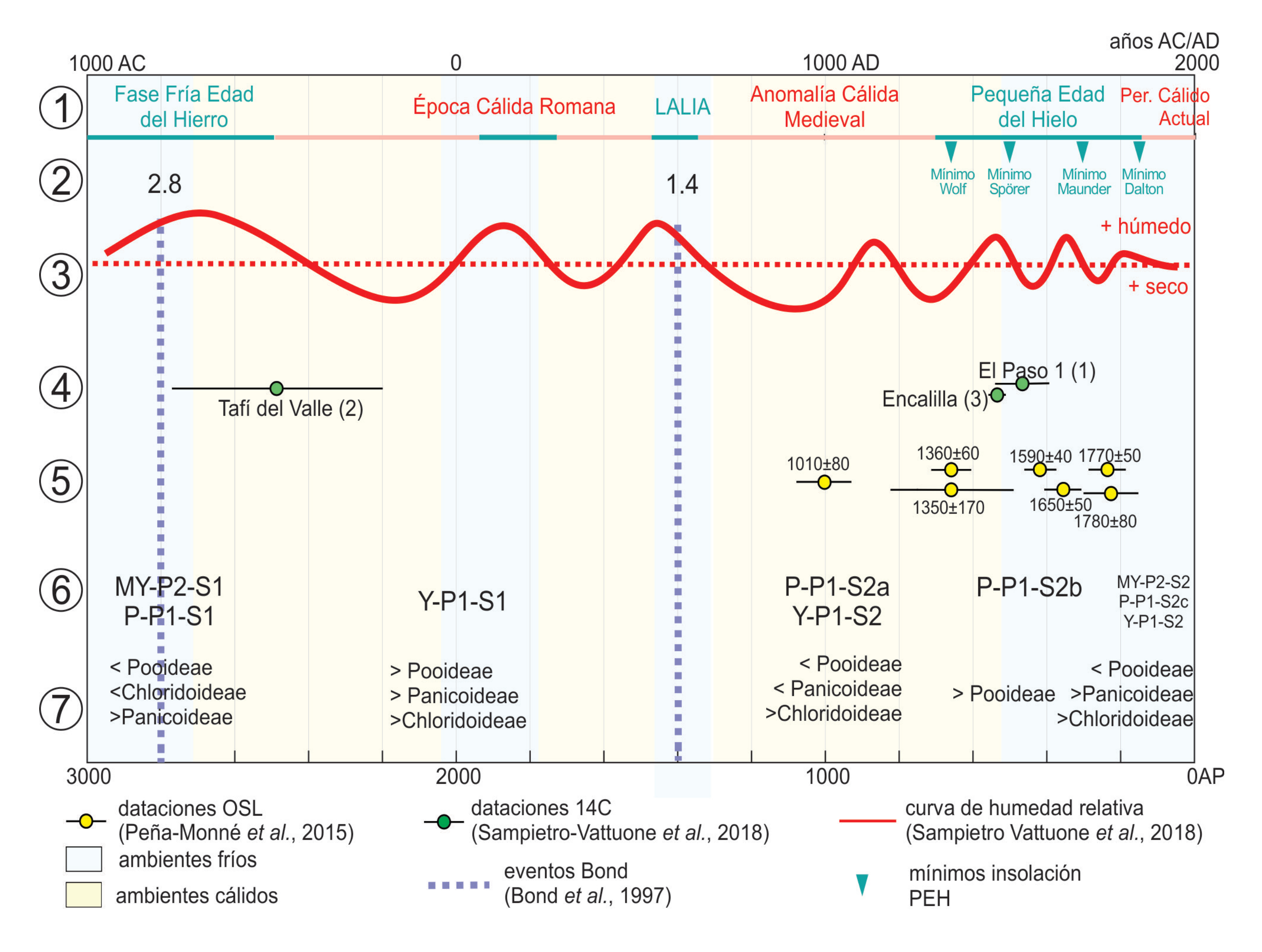



**Figura 9.** Relación de las tendencias ambientales regionales y globales con las secciones de los perfiles descriptos y sus asociaciones fitolíticas: **1,** tendencias climáticas globales; **2,** Eventos Bond (Bond *et al.*, 1997); **3,** curva de reconstrucción de humedad relativa propuesta por Sampietro *et al.* (2018); **4,** paleosuelos datados en la región (Tafí del Valle: Sampietro Vattuone, 1999; El Paso 1: Sampietro Vattuone *et al.*, 2018; Encalilla: Sayago *et al.*, 2012); **5,** dataciones OSL de activaciones dunarias en Cafayate (Peña Monné *et al.*, 2015); **6,** secciones de los perfiles de Molle Yaco, El Pichao y Yasyamayo; **7,** asociaciones fitolíticas típicas de cada sección.

megatérmicos pertenecientes a las subfamilias Panicoideae, Pooideae y Chloridoideae. Por correlación estratigráfica con los datos conocidos de la zona se trataría de una manifestación de la Anomalía Cálida Medieval (Figs. 8, 9.6–7). La siguiente subsección, P-P1-S2b, estaría reflejando condiciones más húmedas que la subsección infrayacente y que la suprayacente (P-P2-S2c), probablemente adscripta a la Pequeña Edad del Hielo (Fig. 9.6–7).

## CONCLUSIONES

El conjunto de la información presentada permite integrar los resultados obtenidos a partir del estudio de fitolitos en un marco evolutivo global, confirmando episodios paleoambientales conocidos a través de otros registros y brindando indicios del comportamiento de la vegetación.

A pesar de que las asociaciones fitolíticas de ambas vertientes del valle de Santa María son marcadamente distintas, las correlaciones estratigráficas permiten establecer tendencias similares entre ambas. Las asociaciones fitolíticas correspondientes a los inicios de la era cristiana reflejan condiciones húmedas y frías, manifiestas en la base de los perfiles de Molle Yaco y El Pichao. La variabilidad aumenta según está representado en Yasyamayo hasta establecerse condiciones áridas y muy cálidas hacia el 1.000 AP, donde se manifiestan asociaciones típicas de fitolitos megatérmicos presentes en las secciones intermedias de los perfiles de El Pichao y Yasyamayo. Posteriormente, las tendencias ambientales cambian y se reflejan en la abundancia de elementos asimilables a oscilaciones templadas y frías, correlacionables con la Pequeña Edad del Hielo. Las condiciones ambientales actuales son homogéneas en todos los perfiles, coherentes con el clima árido y cálido actual.

Este trabajo constituye la primera integración de diferentes disciplinas como la geoarqueología, pedología, arqueología y arqueobotánica, que permite obtener datos ambientales regionales. Una mayor profundización, acompañada de la descripción de perfiles más potentes y con materiales datables por métodos absolutos, constituirá un factor de gran interés en la obtención de las consecuentes correlaciones estratigráficas sólidas a nivel regional susceptibles de aportar mayor resolución temporal.

## AGRADECIMIENTOS
A la Comunidad India Quilmes y a la Comunidad Amaicha del valle, por su constante acompañamiento. Al Dr. J. L. Peña Monné y a los revisores por la lectura crítica del manuscrito. Este trabajo se ha llevado a cabo con los fondos del PICT2018-1119 y PICT2019-0193 de la ANPCyT (Argentina) y PIUNT G629.

## REFERENCIAS

Albert, R. M. (2000). *Study of ash layers through phytolith analyses from the Middle Paleolithic levels of Kebara and Tabun cave (Israel)* [Tesis Doctoral]. Universitat de Barcelona.

Albert, R. M., Bar Yosef, O., Meignen, L. y Weiner, S. (2003). Quantitative phytolith study of hearths from the Natufian and Middle Palaeolithic levels of Hayonim Cave (Galilee, Israel). *Journal of Archaeological Science*, *30*, 46–480.

Albert, R. M., Bamford, M. K. y Cabanes, D. (2006). Taphonomy of phytoliths and macroplants in different soils from Olduvai Gorge (Tanzania) and the application to Plio–Pleistocene palaeoanthropological samples. *Quaternary International*, *148*, 79–94.

Alexandré, A. (1999). Late Holocene phytolith and carbón-isotope record from a latosol et salitre, South Central Brazil. *Quaternary Research*, *51*, 187–194.

Barboni, D., Bonnefille, R., Alexandre, A. y Meunier, J. D. (1999). Phytoliths as paleoenvironmental indicators, West Side Middle Awash Valley, Ethiopia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, *152*, 87–100.

Berlin, A. M., Ball, T. B., Thompson, R. y Herbert, S. C. (2003). Ptolemaic Agriculture, "Syrian Wheat", and *Triticum aestivum*. *Journal of Archaeological Science*, *30*, 115–121.

Bertoldi de Pomar, H. (1971). Ensayo de clasificación morfológica de los silicofitolitos. *Ameghiniana*, *8*(3–4), 317–328.

Borrelli, N., Alvarez, M. F., Osterrieth, M. L. y Marcovecchio, J. (2010). Silica content in soil solution and its relation with phytolith weathering and silica biogeochemical cycle in Typical Argiudolls of the Pampean Plain, Argentina a preliminary study. *Journal of Soils and Sediments*, *10*, 983–994.

Bond, G., Showers, W., Cheseby, M., Lotti, R., Almasi, P., deMenocal, P., Priore, P., Cullen, H., Hajdas, I. y Bonani, G. (1997). A Pervasive Millennial-Scale Cycle in North Atlantic Holocene and Glacial Climates. *Science*, *278*(41–53), 1257–1266.

Bozarth, S. (1992). Classification of opal phytoliths formed in selected dicotyledons native to the Great Plains. En G. Jr. Rapp y S. C. Mullholland (Eds.), *Phytolith systematics: Emerging issues* (pp. 193–214). Springer.

Büntgen, U., Myglan, V. S., Ljungqvist, F. Ch., McCormick, M., Di Cosmo, N., Sigl, M., Jungclaus, J., Wagner, S., Krusic, P. J., Esper, J., Kaplan, J. O., De Vaan, M. A. C., Luterbacher, J., Wacker, L., Tegel, W. y Kirdyanov, A. V. (2016). Cooling and societal change during the Late Antique Little Ice Age from 536 to around 660 AD. *Nature Geoscience*, *9*(3), 231–236.

Cabrera, A. L. (1971). Fitogeografía de la República Argentina. *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica*, *14*, 1–2.

Cabrera, A. L. (1976). Regiones fitogeográficas argentinas. En W. F. Kugler (Ed.), *Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería* (pp. 1–85). Editorial Acmé.

Campbell, I. D., Campbell, C., Apps, M. J., Rutter, N. W. y Bush, A. B. (1998). Late Holocene ~1500 yr climatic periodicities and their implications. *Geology*, *26*(5), 471–473.

Cano, S. F. (2011). *Utilización de Recursos Vegetales y Subsistencia en el Valle de Santa María durante el Período de Desarrollos*

*Regionales: Un Caso de Estudio en el Sitio El Pichao (S Tuc Tav 5)*. [Tesis de grado inédita]. Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo, Universidad Nacional de Tucumán.

Carrizo, J. y Grau, A. (2014). *Plantas silvestres de los valles Calchaquíes. Guía visual.* Universidad Nacional de Tucumán.

Catalano, S. A., Hughes, C. E., Ringelberg, J. J. y Lewis, G. P. (2023). Desintegración del género Prosopis l. (Leguminosae, Caesalpinoideae). *Actas de las 39° Jornadas Argentinas de Botánica - Conferencias Magistrales 58*, 1. San Fernando del Valle de Catamarca.

Cornell, P. y Johansson, N. (1993). Desarrollo del asentamiento del Sitio STucTav 5 (El Pichao). Provincia de Tucumán, comentarios sobre dataciones de 14C y luminiscencia. *Publicaciones Instituto de Arqueología* e *Investigaciones*, *1*, 31–43.

Escudero Martínez, M. T. (1991). *Análisis de prioridades para la conservación en el valle del río Santa María - Sector occidental* [Tesina de la carrera de Biología orientación Botánica inédita] Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo, Universidad Nacional de Tucumán.

González, O. E. M., Viruel, R., Mon, P. y Tchilinguirian y Barber, E. (2000). Hoja Geológica 2766-II San Miguel de Tucumán, provincias de Tucumán, Catamarca, Salta y Santiago del Estero. *Boletín Servicio Geológico Minero Argentino n° 245*. Buenos Aires.

Grimm, E. C. (1987). Coniss: A Fortran 77 Program for Stratigraphically Constrained Clúster Analysis by the Method of the Incremental Sum of Squares. *Computer and Geosciences*, *13*, 13–35.

Hammer, O., Harper, D. A. T. y Ryan, P. D. (2001). *PAST – Palaeontological STatistics, 1.75*. Nature History Museum, University of Oslo. https://palaeo-electronica.org/2001_1/past/past.pdf

Hart, D. y Humphreys, G. (2003). Phytolith depth functions in surface regolith materials. En I. C. Roach (Ed.), *Advances in Regolith* (pp. 159–163). Cooperative Research Centre for Landscape Environments and Mineral Exploration.

Hughes, C. E., Ringelberg, J. J., Lewis, G. P. y Catalano, S. A. (2022) Disintegration of the genus *Prosopis* L. (Leguminosae, Caesalpinioideae, mimosoid clade). *PhytoKeys*, *205*, 147–189.

IUSS Working Group WRB. (2022). *World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition*. International Union of Soil Sciences.

Kondo, R., Childs, C. y Atkinson, I. (1994). *Opal phytoliths of New Zealand*. Maanaki Whenua Press.

Kulemeyer, J., Lupo, L. C., Madozzo Jaén, M. C., Cruz, A., Cuenya, P., Maloberti, M., Cortés, G. y Korstanje, M. A. (2013). Desarrollo del Paisaje Holoceno en la Cuenca de El Bolsón: gente y ambiente en procesos de cambio y estabilidad. *Diálogo Andino*, *41*, 25–44.

Fernández Honaine, M. (2007). *Análisis fitolítico del pastizal del* Paspalum quadrifarium *y su relación con la evolución pedológica en el sudeste de la provincia de Buenos Aires* [Tesis Doctoral inédita]. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Mar del Plata.

Fernández Honaine, M., Osterrieth, M. y Zucol, A. (2009). Plant communities and soil phytolith assemblages relationship in native grasslands from southeastern Buenos Aires Province, Argentina. *Catena*, *76*, 89–96.

Fredlund, G. y Tieszen, L. (1994). Modern phytolith assemblages from the North American Great Plains. *Journal of Biogeography*, *21*, 321–335.

Lanzelotti, S. L. (2012). *Uso del espacio y construcción del paisaje agrícola en la cuenca del río Caspinchango, Valle de Yocavil, Provincia de Catamarca* [Tesis Doctoral inédita]. Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Buenos Aires.

Lanzelotti, S. L. y Zucol, A. F. (2019). Cercanía espacial y distancia temporal entre una unidad doméstica y las estructuras agrícolas adyacentes en el valle de Yocavil. *Relaciones Antropológicas*, *20*(1), 137–152.

Lefebvre, M. G. (2021). *Las asociaciones vegetales de campos agrícolas prehispánicos durante el Holoceno superior en el valle de Santa María: paleoambiente y agricultura* [Tesis Doctoral inédita]. Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo, Universidad Nacional de Tucumán.

Lefebvre, M. G., Colobig, M. de los M., Zucol, A. F. y Sampietro Vattuone, M. M. (2021). Caracterización fitolítica de las secuencias sedimentarias del sitio arqueológico El Pichao (Noroeste Argentino): cambios ambientales y antrópicos durante el Holoceno superior. *Estudios atacameños*, *67*, 1–25.

Maldonado, M. G., Sampietro Vattuone, M. M., Blasi, A. M., Castiñeira Latorre, C., Peña Monné, J. L. y Pigoni, M. A. (2016). Estratigrafía, paleoambiente y procesos de formación de sitio en El Paso durante el Holoceno tardío (valle de Santa María - noroeste argentino). En M. M. Sampietro Vattuone y J. L. Peña Monné (Eds.), *Geoarqueología de los Valles Calchaquíes* (pp. 121–144). Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo.

Minetti, J. L. (2005). *El Clima del Noroeste Argentino*. Editorial Magna.

Mulholland, S. C. (1989). Phytolith shape frequencies in North Dakota grasses: a comparison to general patterns. *Journal Archaeology Science*, *16*, 489–511.

Mulholland, S. C. y Rapp, G. Jr. (1992). A morphological classification of grass silica- bodies. En G. Jr. Rapp y S. C. Mulholland (Eds.), *Phytolith Systematics. Emerging Issues, Advances in Archaeological and Museum Science* (pp. 65–89). *Springer*, Boston, Massachusetts.

Neumann, K., Fahmy, A., Lespez, L., Ballouche, A. y Huysecom, E. (2009). The Early Holocene palaeoenvironment of Ounjougou (Mali): phytoliths in a multiproxy context. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, *276*, 87–106.

Neumann, K., Fahmy, A., Müller-Scheeßel, N. y Schmidt, M. (2015). Taxonomic, ecological and palaeoecological significance of leaf phytoliths in West African grasses. *Quaternary International*, *30*, 1–18.

Neumann, K., Stromberg, C. A. E., Ball, T., Albert, R. M., Vrydagh, L. y Scott Cumming, L. (2019). International code for phytolith nomenclature (ICPN) 2.0. *Annals of Botany*, *20*, 1–11.

Novello, A., Barboni, D., Berti Equille, L., Mazur, J. Ch., Poilecot, P. y Vignaud, P. (2012). Phytolith signal of aquatic plants and soils in Chad, Central África. *Review of Palaeobotany and Palynology*, *178*, 43–58.

Núñez Regueiro, V. y Tartusi, M. (1993). Orígenes de la ocupación prehispánica del sitio STucTav 5 (El Pichao), Provincia de Tucumán. *Publicaciones del Instituto de Arqueología*, *2*, 19–30.

Ollendorf, A. L. (1992). Towards a classification scheme of sedge (Cyperaceae) phytoliths. En G. Jr. Rapp y S. C. Mulholland (Eds.), *Phytolith systematics. Emerging issues* (pp. 91–106). *Springer Science.*

Osterrieth, M. (2000). Silicofitolitos una herramienta para la comprensión de procesos pedológicos del Cuaternario. *Actas del 17° Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo* (pp. 4). Mar del Plata.

Osterrieth, M. (2008). Silicofitolitos en suelos, paleosuelos y materiales parentales. En A. Zucol, M. Osterrieth y M. Brea (Eds.), *Fitolitos. Estado actual de sus conocimientos en América del Sur* (pp. 5–85). Universidad Nacional de Mar del Plata.

Osterrieth, M., Madella, M., Zurro, D. y Álvarez, M. F. (2009). Taphonomical aspects of silica phytoliths in the loess sediments of the Argentinean Pampas. *Quaternary International*, *193*(1–2), 70–79.

Patterer, N. I., Passeggi, E. y Zucol, A. F. (2011). Análisis fitolíticos de suelos del sudoeste de la Provincia de Entre Ríos (Argentina) como una herramienta para comprender sus procesos pedológicos. *Revista mexicana de Ciencias Geológicas*, *28*(1), 32–146.

Peña Monné, J. L., Sancho Marcén, C., Sampietro Vattuone, M. M., Rivelli, F., Rhodes, E. J., Osácar Soriano, M. C. y García Giménez, R. (2015). Geomorphological study of the Cafayate dune field (Northwest Argentina) during the last millennium. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, *438*, 352–363.

Peña Monné, J. L. y Sampietro Vattuone, M. M. (2016). La secuencia paleoambiental holocena de la vertiente oriental de loma pelada (Valle de Tafí, noroeste argentino): cambios climáticos y acción humana. En M. M. Sampietro Vattuone y J. L. Peña Monné (Eds.), *Geoarqueología de los Valles Calchaquíes* (pp. 23–64). Laboratorio de Geoarqueología, Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo.

Peña Monné, J. L. y Sampietro Vattuone, M. M. (2018). Paleoambientes Holocenos del valle de Tafí (Noroeste Argentino) a partir de registros morfosedimentarios y geoarqueológicos. *Boletín Geológico y Minero*, *129*(4), 671–691.

Perea, M. C. (1991). *Análisis de Prioridades para la Conservación en el Valle del Río Santa María, Tucumán, Sector Oriental* [Tesis de Licenciatura inédita]. Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo, Universidad Nacional de Tucumán.

Perea, M. C. (1995). Mapa de vegetación del Valle de Santa María, sector oriental (Tucumán, Argentina). *Lilloa, 38*, 128–131.

Pietragalla, V. y Corso, M. L. (2008). *Proyecto de evaluación de la degradación de tierras de zonas áridas (LADA). Informe de avance a escala local.* Secretaria de Medio Ambiente de la Nación Argentina. https://www.argentina.gob.ar/interior/ambiente

Piperno, D. R. (1988). *Phytolith analysis: an archaeological and geological perspective*. Academic Press.

Puchulu, M. E. y Fernández, D. S. (2014). Características y distribución espacial de los suelos de la provincia de Tucumán. En S. Moyano, M. E. Puchulu, D. Fernández, G. Aceñolaza, M. E. Vides y S. Nieva (Eds.), *Geología de Tucumán* (pp. 240–256). Colegio de Graduados en Ciencias Geológicas de Tucumán.

Rodríguez Antón, D. (2023). El análisis de fitolitos y otros restos vegetales: una nueva metodología arqueoambiental aplicada a la reconstrucción de los paisajes culturales de alta montaña durante el Holoceno. *Treballs d'Arqueologia*, *26*, 127–153

Roldán, J., Vattuone, M. y Sampietro Vattuone, M. M. (2014). Agricultura prehispánica en Yasyamayo (valle de Santa María, Tucumán, Argentina). *Estudios Atacameños*, *47*, 83–100.

Rosen, A. M. y Weiner, S. (1994). Identifying ancient irrigation: a new method using opaline phytoliths from emmer wheat. *Journal of Archaeological Science*, *21*, 125–132.

Ruíz Huidobro, O. (1972). Descripción geológica de la Hoja 11e, Santa María (Prov. de Catamarca y Tucumán). *Boletín del Servicio Nacional Minero Geológico*, *134*, 1–72.

Runge, F. (1999). The opal phytolith inventory of soils in central Africa - quantities, shapes, classification and spectra. *Review of Palaeobotany and Palynology*, *107*, 23–53.

Sampietro Vattuone, M. M. y Neder, L. (2011). Quaternary Landscape Evolution and Human Occupation in Northwestern Argentina. *Geological Society Special Publications*, *352*, 37–47.

Sampietro Vattuone, M. M., Perea, C., Maldonado, M. G., Roldán, J. y Neder, L. (2012). Asentamientos formativos de la vertiente occidental de Cumbres Calchaquíes y su vinculación con las reconstrucciones paleoambientales existentes (Tucumán-Argentina). *Actas del 5° Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología* (pp. 93–102). Córdoba.

Sampietro Vattuone, M. M., Roldán, J., Maldonado, M. G., Lefebvre, M. G. y Vattuone, M. A. (2014). Agricultural suitability and fertility in occidental piedmont of Calchaquíes Summits (Tucumán, Argentina). *Journal of Archaeological Science*, *52*, 363–375.

Sampietro Vattuone, M. M., Roldán, J., Peña Monné, J. L., Lefebvre, M. G., y Vattuone, M. A. (2016). Las prácticas agrícolas durante el Formativo y los Desarrollos Regionales en los sitios de Molle Yaco y Yasyamayo (valle de Santa María). En M. M. Sampietro Vattuone y J. L. Peña Monné (Eds.), *Geoarqueología de los Valles Calchaquíes* (pp. 185–211). Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo.

Sampietro Vattuone, M., Peña Monne, J. L., Roldán, J., Maldonado, M. G., Lefebvre, M. G. y Vattuone, M. (2018). Human-driven geomorphological processes and soil degradation in Northwest Argentina: A geoarchaeological view. *Land degradation & development*, *29*(11), 3852–3865.

Sampietro Vattuone, M. M., Peña Monné, J. L., Roldan, J., Dip, A. B., Maldonado, M. G., Lefebvre, M. G. y Vattuone, M. A. (2019). Land management and soil degradation evidence during the Late Holocene in Northwest Argentina (La Costa 2 - Tafí valley). *Catena*, *187*, 104–392.

Sampietro Vattuone, M. M. y Peña Monné, J. L. (2023). Geomorphological evolution of the western piedmont of Cumbres Calchaquíes (Tucumán Province, NW Argentina). *Journal of Maps, 19*(1), 2168569.

Sayago, J. M., Neder, L. Del V. y Puchulu, M. E. (1998). Suelos. En M. Gianfrancisco, M. E. Puchulu, J. Durango de Cabrera y F. G. Aceñolaza (Eds.), *Geología de Tucumán* (pp. 275–284). Colegio de Graduados de Ciencias Geológicas de Tucumán.

Sayago, J. M., Collantes, M. M. y Niz, A. (2012). El umbral de resiliencia del paisaje en el proceso de desertificación de los valles preandinos de Catamarca (Argentina). *Acta Geológica Lilloana*, *24*(1–2), 62–79.

Sesma, P., Guido, E. y Puchulu, M. (1998). Clima de la Provincia de Tucumán. En M. Gianfrancisco, M. E. Puchulu, J. Durango de Cabrera y F. G. Aceñolaza (Eds.), *Geología de Tucumán* (pp. 41–46). Colegio de Graduados en Ciencias Geológicas de Tucumán.

Soreng, R. J., Peterson, P. M., Zuloaga, F. O., Romaschenko, K., Lynn, G. C., Teisher, J. K., Gillespie, L. J., Barberá, P., Welker, C. A. D., Kellogg, E. A., Li, De-Zhu y Gerrit, D. (2022). A worldwide phylogenetic classification of the Poaceae (Gramineae) III: An update. *Journal of Systematics and Evolution*, *60*(3), 473–521.

Stenborg, P. (2002). Holding Back History: Issues of Resistance and Transformation in a Post-Contact Setting, Tucumán, Argentina c. A.D.1536-1660. [Tesis de Doctorado inédita] Archaeology Department, University of Gothenburg.

Strecker, M. R. (1987). *Late Cenozoic landscape in Santa María valley, Northwestern Argentina* [Tesis Doctoral inédita]. Faculty of the Graduate School, Cornell University, USA.

Strömberg, C. (2003). *The origin and spread of grass-dominated ecosystems during the Tertiary of North America and how it relates to the evolution of hypsodonty in Equids* [Tesis Doctoral]. University of California.

Strömberg, C. (2004). Using phytolith assemblages to reconstruct the origin and spread of grass-dominated habitats in the Great Plains during the late Holocene to early Miocene.

*Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, *207*, 239–275.

Strömberg, C., Werdelin, L., Friis, E. M. y Saraç, G. (2007). The spread of grass-dominated habitats in Turkey and surrounding areas during the Cenozoic: phytolith evidence. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, *250*(1–4), 18–49.

Twist, P. C., Suess, E. y Smith, R. M. (1969). Morphological classification of grass phytoliths: Soil scince of America. *Soil Science Society of America, Proceedings*, *33*, 109–115.

Twiss, P. C. (1992). Predicted world distribution of C3 and C4 grass phytoliths. En G. Jr. Rapp y S. C. Mulholland (Eds.), *Phytolith systematics. Emerging issues Advances in Archaeological and Museum Science* (pp. 113–128). *Srpinger*, Boston.

Walanus, A. y Nalepka, D. (2002). *POLPAL. Counting Pollen, Tables Storage and Diagrams Plotting. System Manual.* W. Szafer Institute of Botany, Polish Academy of Sciences.

Zucol, A. F. (1996). Microfitolitos de las Poaceae argentinas: I. Microfitolitos foliares de algunas especies del género Stipa (Stipeae: Arundinoideae), de la Provincia de Entre Ríos. *Darwiniana*, *34*, 151–172.

Zucol, A. F., Passeggi, E., Brea, M., Patterer, N. I., Fernández Pepi, G. y Colobig, M. M. (2010). Phytolith analysis for the patrokaike lake drilling proyect: sample treatment protocols for the pasado microfossil manual. En H. Corbella y N. I. Maidana (Eds.), *1° Reunión Internodos del Proyecto Interdisciplinario Patagonia Austral y 1° Workshop Argentino del Proyecto Potrok Aike MaarLake Sediment Archive Drilling Project*. (pp. 81–84). Proyecto Editorial PIPA.

Zurro, D. (2006). El análisis de fitolitos y su papel en el estudio del consumo de recursos vegetales en la prehistoria: bases para una propuesta metodológica materialista. *Trabajos de Prehistoria*, *63*(2), 35–54.

doi: 10.5710/PEAPA.27.03.2024.494

**Recibido:** 17 de noviembre 2023

**Aceptado:** 27 de marzo 2024

**Publicado:** 1 de mayo 2024

